

令和 元年 7 月 1 日現在

機関番号：82677

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04624

研究課題名(和文)アーバン・クール・スポットを創出する都市樹木の最適な樹冠形状の効果検証

研究課題名(英文)Verification of the optimum crown shape effect of urban trees creating urban cool spots

研究代表者

手代木 純 (TESHIROGI, Jun)

公益財団法人都市緑化機構・都市緑化技術研究所・主任研究員

研究者番号：70537026

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、公園や街路樹等における都市樹木の最適な樹冠のサイズ・規格、および配置間隔を、実測およびシミュレーションの両面から検討することをめざし、これまで別個に検討されてきた、歩行者空間の温熱快適性とメンテナンス上のリスクの評価を統合して、この両面から最適な樹冠の大きさ、高さを提案する試みを行った。

具体的には、樹木の最適な樹冠サイズを造園・緑化分野の視点で検討し、その上で建築環境工学の視点で樹冠による都市環境面における熱的な効果をシミュレーションにより明らかにした。特に、SET*の要因分解を行った結果、樹冠形状や葉面積密度の変更によるMRTの変化は気象要素の中でSET*への寄与度が最も高かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、公園や公開空地、街路樹等の都市樹木を対象として、人間の活動域での快適性を向上させるために有効な、最適となる樹冠形成を、熱環境面、管理に関するリスクを考慮して検証した。両者による最適解の検討結果から、最適樹冠は枝下高さ2.5m、枝張6mとなった。

温熱環境シミュレーションにより、樹冠形状、葉面積密度や、列植時の植栽間隔を変えて比較することで、温熱環境改善効果の差異の要因を明らかにした。さらに最適樹冠が形成された現場において、猛暑日のSET*、WBGT等を実測し、その効果を確認した。

本研究により、夏期における都市内の快適な緑陰形成に関する実現性の高い、有効な知見を得ることが出来た。

研究成果の概要(英文)：Tree planting in urban spaces is one of the most popular countermeasures against urban warming. This study aims to examine the influence of differences in branch height, tree crown width, and leaf area density on the thermal environment in a pedestrian space using unsteady radiation and conduction simulations, and non-isothermal CFD simulations.

The tree canopy model, was used to reproduce the following effects: (i) aerodynamic effects of planted trees, (ii) shading effects on short-wave and long-wave radiation, (iii) production of sensible and latent heat from plant canopy. First, unsteady radiation and conduction simulations were performed and spatial distributions of MRT were compared for each case. Second, non-isothermal CFD simulations were performed for each case using a revised k- model. Finally, using the results of unsteady radiation and conduction simulations and non-isothermal CFD simulations, SET* was calculated for each case.

研究分野：環境農学(含ランドスケープ科学)

キーワード：環境緑化学 緑陰

都市環境 実測 街路樹 シミュレーション 枝下高 最適樹冠

1. 研究開始当初の背景

- ・ 樹木は屋外環境設計上の極めて重要な要素であり、特に暑熱環境緩和にはもっとも効果の高い方策である。この機能は、日射の遮蔽による緑陰の形成機能と、蒸散による潜熱消費による気温低減効果という両面によっている。このような樹木を都市の空間に適切に配置することにより、人間の活動域での熱ストレスを低減させ、快適性を向上させるかが課題となってくる。
- ・ 都市における樹木、特に高木を、快適性確保と管理の両面から、最大ではなく最適なサイズ、規模による樹冠を形成し、その効果を確認することは、快適な都市環境の形成のために重要である。
- ・ 高木においては枝葉を上げ大きな緑陰を作るものほど効果が高いが、都市空間においては枝が上げられる空間を確保する必要があるだけでなく、植栽空間の管理にかかる剪定などの手間やコスト、管理上のリスクなど、多くの課題がある。
- ・ 筆者らはすでに、単木や樹林といった樹冠のまとまりの違いによる蒸散量の差異と気温等の環境条件の関係を整理した。蒸散量をもとに詳細な潜熱消費量の把握が可能となり、日射遮蔽の効果と切り分けての評価が可能となった。
- ・ 本研究では、これを発展させて、都市樹木の最適な樹冠のサイズ・規格、および配置間隔を、実測およびシミュレーションの両面から検討することをめざしものである。
- ・ 快適な都市環境の形成のため快適性確保とリスク管理の両面から、最大ではなく**最適なサイズ、規模による樹冠を形成し、その効果を確認することが重要**である。この研究により創出するこうした樹冠を「アーバン・クール・スポット」と呼び、実証実験と実現のための課題・指針づくりについて研究を行うものである。

2. 研究の目的

本研究は、公園や公開空地等（街路樹を含む）に植栽されている都市内樹木を対象として、人間の活動域でのストレスを低減させて快適性を向上させるため、①都市内樹木の最適な樹冠のサイズ・規格、および配置間隔を実測研究結果およびシミュレーションの両面から検討し、②最適な樹冠形成モデルとなる実大サイズの樹冠を実際に作成し、③温熱環境低減効果を中心とした効果を実測し、④効果を検証する。これにより、アーバン・クール・スポットの創出の有効性を明らかにすることで、従来より格段に精緻な都市環境設計や植栽計画に寄与するものである。

3. 研究の方法

以下の項目に沿って研究を進めた。

- (1) 単木の最適解の検討
- (2) 適切な樹冠形成手法の検討
- (3) シミュレーションによる最適解の検討
- (4) 管理上の課題の検討
- (5) 最適な樹冠形成モデルの設定（温熱環境上、生育上）
- (6) 最適解に基づく樹冠形成モデルの作成、設定
- (7) 効果の測定、および検証

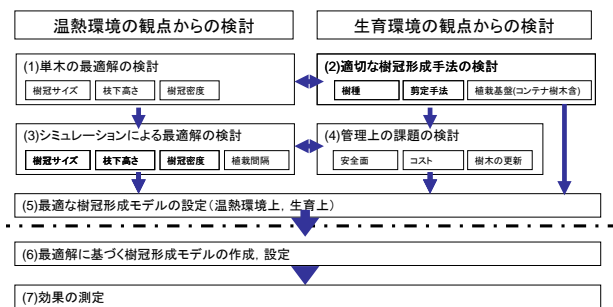


図1 研究の全体フロー

4. 研究成果

4.1 最適な樹冠形成モデルの検討（上記(1)～(3)）

都市内の樹木による人間の活動域の快適性を向上させるため、最適な樹冠の大きさを導き出すことを目的とする。その方法として、シミュレーションベースで複数のケースを比較し、温熱環境面、実際の維持管理面の両面を踏まえて設定する。

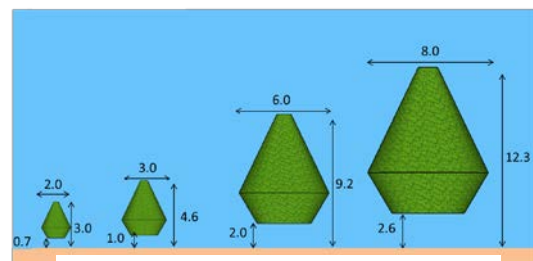


図2 各ケースの樹木形状

4.1.1 比較パラメータの検討：3次元放射解析とCFD解析に樹冠の大きさを示すパラメータとして入力する要素として、樹高、枝下高、枝張を設定する。また樹冠内の密度は葉面積密度を

検討する。

4.1.2 樹種：わが国の街路樹として広く使用されている上位6樹種とした。

4.1.3 シミュレーションによる最適解の検討： 樹木の枝張りに着目して、樹木(イチヨウを想定)の大きさを変更した場合の解析を行った。(図2)

4.2 管理面から踏まえた適切な樹冠規模の検討(上記(4))

都市内の高木として多く植栽されている街路樹における管理実態について、専門家や実務家にヒアリングした。現在の街路樹の剪定作業は、人力で木に登る場合と高所作業車を用いる場合があるが、ここでは人力による剪定作業を想定して検討する。その場合、幹から剪定する枝先まで横幅で片側3mはそれほど難しくはないが片側4mの場合は作業上厳しくなることが指摘された。また上記4.1.2で検討した結果、6m、8mに大きな差が見られなかったことから、温熱環境面、管理面の両面を踏まえた適切な枝張りは6mを基本として検討する。樹高は、樹高>枝張りとなる条件で、かつ剪定作業に要する労力・コストを抑制することも考慮し、8mを基本として検討する。

なおこれらの検討を踏まえて、適切な樹冠形成の維持管理方法の検討を行った。

4.3 最適な樹冠形成モデルの設定と検証(上記(5))

4.3.1 比較する樹形：比較対象樹木の形状、スペックを、表1、図3の通りとした。

表1 解析ケース

ケース	枝張り [m]	樹高 [m]	枝下高さ [m]	葉面積密度 a [m ² /m ³]	樹形
CaseA-1	4	8	2.5	0.86	円柱形(基本ケース)
CaseA-2				0.45	円柱形(基本ケース)
CaseA-3				1.59	円柱形(基本ケース)
CaseB-1	6	9.7	4.5	0.86	円柱形(枝下高い)
CaseC-1			2.5	0.86	円柱形(枝張広い)
CaseD			2.5	0.86	イチヨウ型(円錐形)
CaseE				0.86	ケヤキ型(逆円錐形)

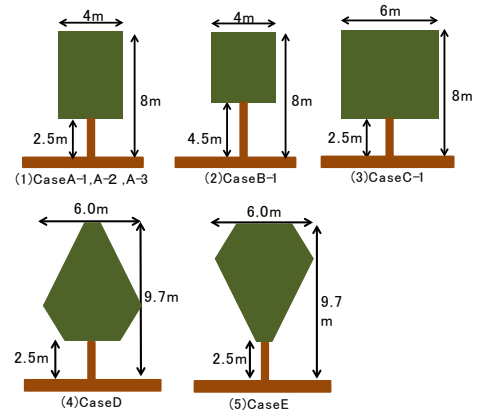


図3 各ケースの樹木形状

4.3.2 比較項目：枝下高さ、枝張り、葉面積密度 a 、樹冠形状を変更した7ケースの放射・流体解析を行い、MRT、風速、気温の分布を比較した。

4.3.3 比較結果：

- 1) SET*の要因分解を行った結果、樹冠形状や葉面積密度の変更による MRT の変化は気象要素の中で SET*への寄与度が最も高く、次に風速、気温の寄与度が高いという結果となった。
- 2) 枝張りが広いケースや葉面積密度 a が大きいケースでは樹冠下で下降流が生じるため、基本ケースと比べ樹冠風下側の風速が大きくなり、SET*の低下に寄与する結果となった。

4.4 最適解に基づく樹冠形成モデルの設定および効果の測定、検証(上記(6),(7))

上記の検討結果に基づき、最適樹冠を形成する現場で実施した温熱環境を実測した。

実施に当たって事前に現地調査を実施し、これまでに検討した最適解の状況とほぼ同一の環境条件にある、東京都内の二箇所で測定を行った。また、既往研究で設置済みの蒸散量測定、超音波風向風速計の結果も活用し、より精緻な樹木の温熱環境にかかるデータの収集も行った。

実測に当たっては、温熱環境指標として建築分野で幅広く用いられている標準新有効温度 SET*と、ISO7243として規定されている湿球黒球温度 WBGT の値を測定結果より求め、その

違いを比較することで、暑熱環境に適応するための定量評価を行った。ここではそのうちの一箇所について、猛暑日の温熱環境実測の結果の概要を報告する。

4.4.1 猛暑環境下での樹木周辺を対象とした温熱環境実測（測定概要）

東京都文京区に位置する日本女子大学目白キャンパス構内(図 1)において、2017 年 8 月 9 日 10:00~15:30 の期間で測定を実施した。樹木の温熱環境改善効果を調べるため、日向部(PointA)と緑陰部(PointB)において、表 1 に示す項目に関する測定を行った。また図 4、図 5 に測定器の配置状況、表 2 に樹木情報を示す。樹種はトウカエデで、葉面積指数 LAI の 5 本の平均値は 3.51 であった。

当該日は快晴の猛暑日となり、同年の東京地方で最も高い最高気温と WBGT 値が記録された。気象庁の測定値は最高気温が 12:14 の 37.1℃、日最大 WBGT が 13:00 の 33.2℃となった。

4.4.2 気象観測等の測定結果

SET*では、日向部が「激しい発汗や圧迫感の増加といった生理現象の不調が生じ始める値」とされる 35℃を一部で上回ったが、緑陰部では 33℃を概ね下回っていた。(図 6)

一方 WBGT について、日向部では「運動は原則中止」とされている 31℃以上の値が 10~14 時台にわたって記録された一方で、緑陰部ではほぼ 31℃以下であった。(図 7)

これら SET*、WBGT の両指標による猛暑日の測定結果から、本研究で示した最適な樹冠が形成された樹木の緑陰下の環境は、屋外で過ごす場合に日向部と比較して安全な環境形成に寄与していることを、今回の測定結果から確認できた。

その他、現地では被験者実験による POMS (感情プロフィール検査) を用いた緑陰とテント日陰による印象の違いを測定した。

4.4.3 列植樹木間隔の変更が各温熱要素の変化を通じて歩行する人間の生理量に及ぼす影響の分析

最適樹冠の形成・配置指針の作成にあたり、平衡流れ場における列植樹木を対象に放射・流体解析を実施し、この結果を用いて樹木下を歩行する人間の生理量予測を行い、樹木間隔の変更が温熱 4 要素(風速、MRT、気温、絶対湿度)及び歩行者の人体生理量に及ぼす影響を評価した。

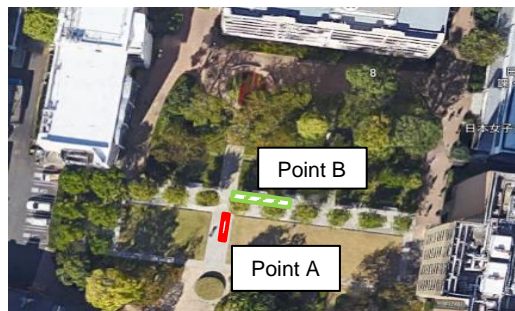


図 4 測定場所

	樹高 [m]	最長枝張り [cm]	枝下高さ [m]	LAI
A	6.3	260	1.9	3.995
B	7.0	190	2.0	2.858
C	7.3	245	2.0	3.694
D	7.0	245	1.9	3.491
E	7.0	260	2.3	3.496

図 5 測定機器の配置状況

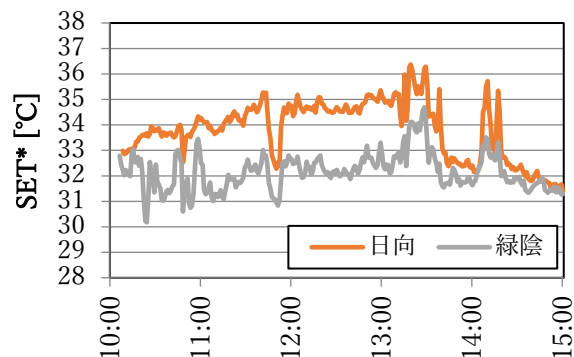


図 6 SET*の結果の比較(2017年8月9日)

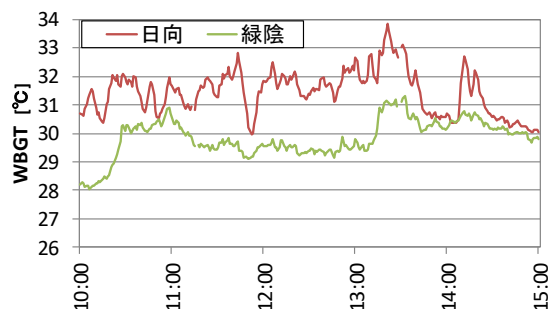


図 7 WBGTの結果の比較(2017年8月9日)

4.4.3.1 樹木間隔の変更が温熱4要素に及ぼす影響

列植樹木を対象とした放射・流体解析として、表3に解析ケース及び解析条件、図8にメッシュ分割を示す。なお、Case_6mは樹冠が接し連続している。MRTは樹木間隔が狭まるほど最大値・最小値ともに低くなる。図9にCase_∞(樹木無)に対する各ケースの温熱4要素のCase_∞(樹木無)からの変化率を示す。気温は最大であったCase_6mでも5%弱の低減であり、他の3ケースではCase_∞(樹木無)からほぼ変化しなかった。間隔が1m広がるとMRTが約1%上昇する関係が見られた。

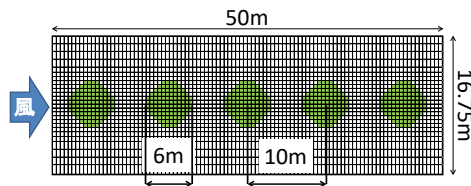


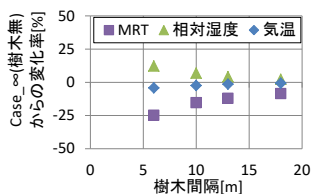
図8 メッシュ分割(Case_10mの例)

表3 解析ケース及び放射解析条件

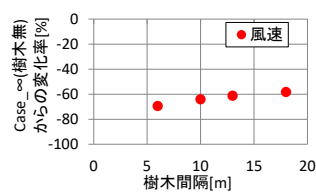
ケース	Case_6m	Case_10m	Case_13m	Case_18m	Case_∞ (樹木無)
樹木間隔	6m	10m	13m	18m	—
メッシュ分割 (x[m]×y[m]×z[m])	54×32×25	78×32×25	96×32×25	120×32×25	28×32×25
解析領域 (x[m]×y[m]×z[m])	530×526×219.7	542×526×219.7	551×526×219.7	566×526×219.7	517×526×219.7

4.4.3.2 列植樹木下を歩行する人間の生理量予測

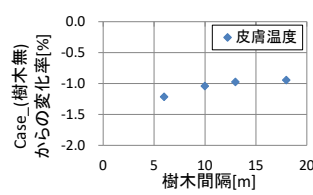
列植樹木の樹冠下を歩行する人間の生理量をTwo-Node modelを用いて予測した。さらに歩行者が瞬間的に曝露される環境条件から求めた皮膚温度より非定常SET*を算出し、歩行者が刻一刻と体感する温熱快適性を評価した。(図10)その結果、樹木間隔が狭いほど、皮膚温度、深部温度は低くなり、発汗も少なくなった。また、許容時間率は樹木間隔が狭まるほど増加し、Case_10mと18mの間で約12%の差が出た。



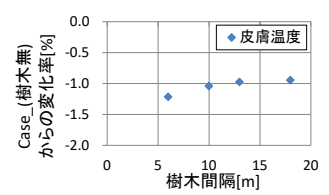
(1) MRT、気温、相対湿度



(2) 風速



(1) 皮膚温度



(2) 深部温度

図9 樹木間隔の違いによる温熱4要素の変化率

図10 樹木間隔の違いによる人体生理量の変化率

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8件)

ライシメーター法による実大高木樹木の植栽密度の違いによる蒸散量の差異の検証／手代木 純，柳 雅之，持田 灯／環境情報科学論文集 31 299-304 2017年11月 (査読有り)
DOI: 10.11492/ceispapers.ceis31.0_299

屋外生活空間における都市樹木の最適な樹冠形状の効果検証(その4)最適な樹冠形状における温熱環境面(WBGT, SET*)での実測結果／手代木純，本間実季，大場優作，石田泰之，新井千秋，柳雅之，持田灯／日本建築学会大会学術講演梗概集・2018 NO.40431 2018年7月 (査読無し)

屋外生活空間における都市樹木の最適な樹冠形状の効果検証(その5)列植樹木間隔の変更が各温熱要素の変化を通じて歩行する人間の生理量に及ぼす影響の分析／本間実季，新井千秋，大場優作，石田泰之，手代木純，持田灯／日本建築学会大会学術講演梗概集・2018 NO.40432 2018年7月 (査読無し)

実測に基づく実大高木樹木の蒸散量の評価(その3)植栽密度差を踏まえた樹木群とシバの夏期の蒸散量の比較／手代木純，市林あゆみ，石田泰之，持田灯，柳雅之／日本建築学会大会学術講演梗概集・2017 NO.40339 2017年7月 (査読無し)

実測に基づく実大高木樹木の蒸散量の評価(その4)樹冠内部の蒸散量に関する詳細測定／本間実季，新井千秋，石田泰之，手代木純，持田灯／日本建築学会大会学術講演梗概集・2017 NO.40340 2017年7月 (査読無し)

屋外生活空間における都市樹木の最適な樹冠形状の効果検証(その1)研究の目的と樹木パラメータの検討／手代木純, 持田灯, 弓野沙織, 内田大貴, 市林あゆみ, 新井千秋／日本建築学会大会学術講演梗概集・2016 NO.40501-teshirogi 2016年7月(査読無し)

屋外生活空間における都市樹木の最適な樹冠形状の効果検証(その2)樹冠形状・葉面積密度の変更が放射場・流れ場に及ぼす影響の分析／市林あゆみ, 新井千秋, 弓野沙織, 内田大貴, 手代木純, 持田灯／日本建築学会大会学術講演梗概集・2016 NO.40502-teshirogi 2016年7月

屋外生活空間における都市樹木の最適な樹冠形状の効果検証(その3)樹冠形状・葉面積密度の変更による各気象要素の変化が SET*増減に与える影響の分析／新井千秋, 弓野沙織, 内田大貴, 市林あゆみ, 手代木純, 持田灯／日本建築学会大会学術講演梗概集・2016 NO.40503-teshirogi 2016年7月(査読無し)

[学会発表] (計 5件)

Study on Long-term Measurement of Transpiration from Multiple Urban Vegetation for Grasping Latent Heat Consumption under Various Conditions／手代木 純／国際都市気候会議 (10th International Conference on Urban Climate) 2018年8月 国際都市気候学会

Evaluation of transpiration rate of tree Long term measurement of time variation and short term measurement of spatial Distribution／本間実季, 持田灯, 市林あゆみ, 新井千秋, 石田泰之, 手代木純／Joint Seminar of Sustainable Building in China, Japan and Korea 2017

Numerical study on effects of shape and leaf area density of urban trees on pedestrian thermal comfort／手代木 純／第8回独日都市気候学会議 2017年3月26日

温熱環境改善を主眼とした都市樹木の最適な樹冠サイズ及び形状の効果検証／手代木 純／アーバンインフラ・テクノロジー推進会議 第28回技術研究発表会 2016年11月10日

A Comparative Study on Evapotranspiration of the Same Trees in Urban Forests and Individual Tree using Lysimeter method／Jun TESHIROGI, Taiki UCHIDA, Ayumi ICHIBAYASHI and Akashi MOCHIDA／WGIN Congress Nagoya 2015年10月

[図書] (計 0件)

該当無し

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

該当無し

○取得状況 (計 0件)

該当無し

[その他]

ホームページ等 無し

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：持田 灯

ローマ字氏名：MOCHIDA Akashi

所属研究機関名：東北大学, 大学院

部局名：工学研究科

職名：教授

研究者番号 (8桁)：00183658

(2) 研究協力者

旧連携研究者

研究協力者氏名：興水 肇、葉袋奈美子、石田 泰之

ローマ字氏名：KOSHIMIZU, Hajime, MINAI, Namiko, ISHIDA, Yasuyuki

研究協力者氏名：柳 雅之、大恵 朋彦、藤田 茂、水崎 貴久彦

ローマ字氏名：YANAGI, Masayuki, OHE, Tomohiko, FUJITA, Shigeru, MIZUSAKI, Kikuhiko